

# 基于雷电物理的风机叶片动态击距与 电气几何模型

王国政<sup>1</sup>, 张黎<sup>1</sup>, 郭子忻<sup>2</sup>, 马宇飞<sup>2</sup>, 李庆民<sup>2</sup>, 闫江燕<sup>2</sup>, 赵彤<sup>1</sup>,  
邹亮<sup>1</sup>, SIEW Wah Hoon<sup>3</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东省 济南市 250061; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学),  
北京市 昌平区 102206; 3. 电子与电气工程系, 思克莱德大学, 格拉斯哥 G11XQ, 英国)

## Dynamic Striking Distance and Electrical Geometry Model of Wind Turbine Blades Based on Lightning Physics

WANG Guozheng<sup>1</sup>, ZHANG Li<sup>1</sup>, GUO Zixin<sup>2</sup>, MA Yufei<sup>2</sup>, LI Qingmin<sup>2</sup>, YAN Jiangyan<sup>2</sup>, ZHAO Tong<sup>1</sup>,  
ZOU Liang<sup>1</sup>, SIEW Wah Hoon<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, Shandong Province, China; 2. State Key Lab of  
Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District,  
Beijing 102206, China; 3. Department of Electronic & Electrical Engineering, The University of Strathclyde, Glasgow G11XQ, UK)

**ABSTRACT:** The damage of wind turbine blades suffered lightning strikes has been a key factor of the safe and reliable operation of wind farms. The electric geometrical model of wind turbine blades (EGMTB) was presented based on the traditional electric geometrical method and the physical process of lightning leader. The concept of dynamic striking distance was introduced and clarified the physical meaning of striking distance. And the calculation method of blade lightning protection system (LPS) efficiency was deduced. Finally, the effectiveness of EGMTB was validated by the long gap breakdown experiment of blades. The EGMTB was used to analyze the influence factors of blade LPS efficiency. It is indicated that the efficiency of blade LPS reduces with the decrease of lightning current and the angle between the blade and horizontal, and the efficiency of blade LPS can be improved by increasing the side lightning receptors. The EGMTB is intended to provide a theory for lightning protection design and evaluation of wind turbine blades.

**KEY WORDS:** wind turbine blade; electric geometrical model; lightning protection; leader progression model;

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51677110, 51420105011); 新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS16018)。

Project Supported by National Natural Science Foundations of China, (51677110, 51420105011); State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (LAPS16018).  
striking distance; efficiency of lightning protection system

(LPS)

**摘要:** 风机叶片遭受雷击现已成为风电场亟需解决的问题之一。该文将电气几何方法与雷电先导发展的物理过程相结合, 提出了针对风机叶片的电气几何分析模型。通过引入风机叶片动态击距的概念及分析方法, 模拟了雷电先导的发展过程, 使得击距的物理意义更加清晰, 并进一步推导了叶片防雷系统效率的计算方法, 最后基于风机叶片长间隙下击穿实验验证了该模型的有效性。利用提出的风机叶片电气几何模型, 分析了叶片角度、雷电流幅值和接闪器布置对防雷系统效率的影响, 分析发现叶片越接近水平、雷电流幅值越小叶片防雷系统效率越低, 增设叶片侧接闪器能够有效提高防雷系统效率。该文提出的方法拟为风机叶片的防雷设计与评估提供理论依据。

**关键词:** 风机叶片; 电气几何模型; 雷电防护; 先导发展模式; 动态击距; 防雷系统效率

## 0 引言

风电作为清洁能源的重要组成部分, 其大规模发展是促进我国能源体系改革的重要技术支撑。然而, 鉴于风机所处的环境及其自身特殊结构, 极易遭受大气雷击。雷击事故中叶片的损伤占到雷击损伤总数的 40%以上, 且多数为不可修复性损伤。风机叶片的成本、吊装、维修等高额费用已严重影响风电场的经济稳定运行<sup>[1-2]</sup>。因此, 寻找一个可靠的方法评估风机叶片防雷系统的效率, 对风机叶片

的防雷设计和促进风电的可持续发展具有重要意义。

当前风机叶片防雷设计多是基于实验研究<sup>[3-5]</sup>, 在叶片周围电场分布、接闪器防护效果等方面取得了一定成果。但实验室的环境与实际风机的运行环境难免存在差异, 其与真实情况的等效性也有待商榷, 且对于不同环境、不同型号的风机叶片都需要进行重复试验, 消耗大量的人力物力, 亟需发展一种叶片防雷效率的评估方法。

20 世纪 60 年代, 国内外学者首次将雷电流的电气参数与线路的几何结构联系起来研究输电线路的屏蔽问题, 随后 Whitehead<sup>[6]</sup>、Brown<sup>[7]</sup>等人在大量实验观测和计算的基础上推出了输电线路的经典电气几何模型, 相对于传统规程法取得了巨大进步。此后人们对电气几何法中的击距公式进行了改进以适应不同的环境, 但是击距公式依旧存在物理概念模糊, 通用性较差的缺点, 且不能体现地面物体不同位置、不同结构的击距变化, 难以应用在像风机叶片这样的复杂旋转结构。随后提出的先导模型阐述了雷电接闪的物理发展过程, 具有更明确的物理意义, 该模型已在实验室长间隙击穿<sup>[8]</sup>、输电线路<sup>[9-10]</sup>和避雷针<sup>[11]</sup>先导发展物理过程研究中获得广泛应用。如今已有学者在先导发展模型基础之上, 提出了风机叶片稳定上行先导起始判据<sup>[12]</sup>; Mengni Long 等人<sup>[13]</sup>在 Becerra 提出的 SLIM 模型<sup>[14-15]</sup>的基础上, 计算了风机叶片各接闪器击距, 解释了叶片远离接闪器部分遭受雷击的现象。但上述研究主要是通过先导模型的反复计算, 对指定点的防雷性能指标进行分析, 并没有给出叶片整体的防雷效率计算方法。

本文将电气几何方法与雷电先导发展的物理过程相结合, 提出了针对风机叶片的电气几何分析模型。通过引入风机叶片动态击距的概念及分析方法, 使得击距的物理意义更加清晰, 并进一步推导了叶片防雷系统效率的计算方法。随后利用该模型分析了实际尺寸(1.5MW)风机叶片防雷系统效率的影响因素, 并基于风机叶片长间隙击穿实验验证了该方法的有效性。提出的风机叶片电气几何模型, 可为风机叶片的防雷设计与评估提供理论依据。

## 1 风机叶片电气几何模型构建原理

电气几何法可以将雷电流参数同被研究物体的几何结构联系起来, 利用击距描述地面物体的引雷能力, 认为雷电下行先导先到达哪个物体的击距

便向哪个物体放电。击距的物理意义为雷云向地面发展的先导放电通道头部到达被击物体的临界击穿距离<sup>[6-7]</sup>。在传统电气几何法的击距计算中, 主要是根据运行数据统计, 或只通过地面物体周围的场强来确定击距, 与实际的雷击过程差距较大。目前应用的击距公式仅是雷电流的函数, 而实际风机叶片的旋转结构是在叶片上嵌有一个或多个接闪器, 因此, 传统的击距计算方法无法体现风机叶片接闪器和叶身(无接闪器部分)击距的不同, 另外也不能考虑叶片旋转角度对击距的影响, 并不适用于风机叶片的防雷计算。

为建立风机叶片的电气几何模型, 本文引入风机叶片动态击距的概念, 其“动态”主要包括两层含义: 第一, 风机叶片上不同位置(如接闪器和叶身)具有不同的击距; 第二, 风机叶片所处位置(如角度和高度)的变化, 也会引起击距的变化。风机叶片的动态击距具有分布特征, 不仅接闪器处存在击距, 叶身处也有对应的击距, 只是叶身的击距较短, 在叶片的平面内可看作距离叶身表面一定距离、曲率较小的非圆弧。图 1 给出了不同角度和叶片上不同位置击距的变化情况。当叶片非竖直向上时, 两侧击距不是严格对称的, 下侧的击距(如图 1(a)下部点划线所示)略小于上侧的击距。当假设雷电竖直向下发展时, 下侧击距不会影响接闪, 考虑到叶片的旋转对称性, 将叶片上侧击距关于叶片轴线对称到下侧, 便于模型的数值计算。

根据上述风机叶片的动态击距概念, 可推导风机叶片雷电防护的电气几何模型, 如图 2 所示, 假设雷电下行先导竖直向下发展。其中,  $R_p$  为叶片接闪器的击距,  $R_b$  为叶片叶身处的击距,  $\theta$  为风机叶片与水平方向的夹角, 取逆时针方向为正。当雷电

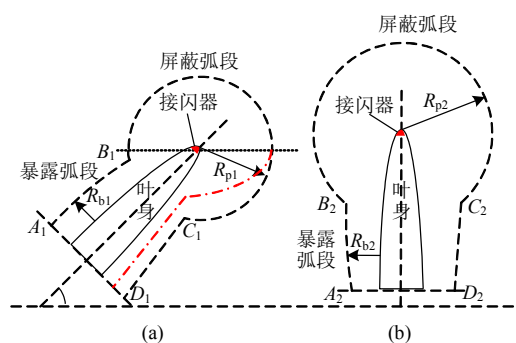


图 1 风机叶片动态击距

Fig. 1 Dynamic striking distance of turbine blades

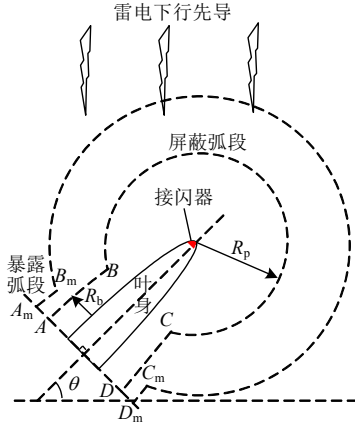


图 2 风机叶片雷电防护电气几何模型

Fig. 2 EGM of blade lightning protection

流幅值为  $I$  时, 叶片的击距对应于弧  $ABCD$ , 其中弧  $AB$ 、 $CD$  为暴露弧,  $BC$  为屏蔽弧,  $A$  点为所研究叶片部分(可以是叶片一部分)对应击距包络线的起始点。当雷电下行先导到达暴露弧  $AB$  时, 则表示叶身遭受雷击, 防雷系统接闪失败。

随着雷电流的增加,  $R_p$  和  $R_b$  也随之增大, 当雷电流增加到  $I_m$  时, 击距范围增加到  $A_m B_m C_m D_m$ , 可以看到暴露弧  $A_m B_m$ 、 $C_m D_m$  相对于雷电流  $I$  时的暴露弧  $AB$ 、 $CD$  明显减小, 当雷电流幅值继续增大, 暴露弧会继续减小至消失, 叶片得到完全屏蔽, 此时所对应的雷电流幅值为叶片可能接闪失败的最大雷电流  $I_{max}$ 。当雷电流的幅值大于  $I_{max}$  时, 叶片的防雷系统能够对叶片完全屏蔽,  $I_{max}$  主要与叶片所处位置及叶片防雷系统的设计有关。对于一个已经设计好的风机叶片防雷系统, 其不能有效屏蔽的雷电流的幅值范围是  $I_{min} < I < I_{max}$ , 其中  $I_{min}$  为使叶片击穿时材料不受损伤的最大雷电流幅值,  $I_{min}$  主要与叶片所用材料及加工工艺有关。若叶片防雷系统设计的防护能力足够强, 使得  $I_{max} < I_{min}$ , 则该叶片防雷系统能够对所有幅值的雷电流有效屏蔽。

风机叶片的电气几何模型通过击距来描述叶片各位置的引雷能力, 动态击距是风机叶片电气几何模型中的一个特征参数, 也是最终定量表征风机叶片防雷效率的基础。要想表征动态击距的变化特性, 就需要考虑叶片不同位置空间电位的畸变情况, 进一步纳入雷电先导发展的物理机制, 从而解决动态击距的计算问题。

## 2 基于先导发展模型的动态击距计算方法

### 2.1 雷云及下行先导电位分布

雷击发展过程中, 背景电位主要由雷云和下行

先导两部分电位组成。本文采用模拟电荷法求取背景电位分布, 雷云和下行先导的电荷分布模型如下。

自然界雷电以负极性雷电为主, 其雷云一般具有 2~3 个电荷中心, 最上层集聚大量正电荷, 下层为负电荷, 最底部有时具有一个或多个弱正电荷区域。Uman 和 Rakov<sup>[16]</sup>采用圆柱电荷堆模型来模拟雷云电荷, 可真实的反应出雷云电荷分布以及空间电位特性。Amorouso 和 Lattarulo<sup>[17]</sup>研究发现当雷云内电荷密度较均匀时, 圆柱电荷堆可以用带电圆盘来简化, 如图 3 所示。模型中取模型中各参数的典型值取为:  $\rho_p = 3\text{nC/m}^3$ ,  $\rho_n = -0.9\text{nC/m}^3$ ,  $h_p = 10\text{km}$ ,  $h_b = 5.5\text{km}$ ,  $h_n = 1.5\text{km}$ 。经过计算轴线上近地面电场强度约在  $10\sim 20\text{kV/m}$  之间, 这与 Eriksson<sup>[18]</sup>、Soula<sup>[19]</sup>和 Willet<sup>[20]</sup>等人的雷云地表电场测量结果相一致。

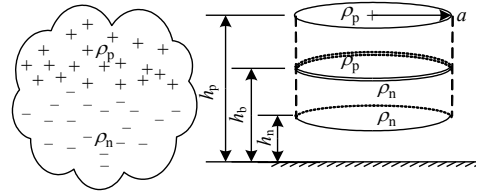


图 3 雷云电荷分布模型

Fig. 3 Charge distribution of thundercloud

雷电下行先导采用 Cooray 提出的先导通道电荷分布模型<sup>[21]</sup>, 该模型与实测值具有良好的吻合性, 先导中电荷密度为

$$\begin{cases} \rho(\zeta) = a_0 \left(1 - \frac{\zeta}{H_c - H_i}\right) G(H_i) I_p + \frac{I_p (a + b\zeta)}{1 + c\zeta + d\zeta^2} L(H_i) \\ G(z_0) = 1 - \frac{H_i}{H_c} \\ L(H_i) = 0.3\alpha + 0.7\beta \\ \alpha = e^{-\frac{H_i - 10}{75}} \\ \beta = 1 - \frac{H_i}{H_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\rho(\zeta)$  为下行先导通道电荷密度,  $\text{C/m}$ ;  $\zeta$  为先导通道中某点距先导头部距离,  $\text{m}$ ;  $I_p$  为雷电流幅值,  $\text{kA}$ ;  $H_c$  为雷云对地高度,  $H_c = h_n = 1500\text{m}$ ;  $H_i$  为先导头部距地高度,  $\text{m}$ ; 各系数为  $a_0 = 1.476 \times 10^{-5}$ ,  $a = 4.857 \times 10^{-5}$ ,  $b = 3.9097 \times 10^{-6}$ ,  $c = 0.522$ ,  $d = 3.73 \times 10^{-3}$ 。

### 2.2 正极性上行先导起始物理机制

随着负极性下行先导向下发展, 地面物体表面电场增加, 由于碰撞电离和附着作用产生了正极性

空间电荷区域, 当正极性空间电荷大于一定值时产生初始电晕<sup>[22]</sup>:

$$\exp\left(\int_{R_0}^R \alpha(E) - \eta(E) dx\right) > N_{\text{cri}} \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  和  $\eta$  分别为碰撞电离系数和附着系数;  $R_0$  为电极曲率半径;  $R$  为碰撞电离区边界;  $x$  为电子崩头部到电极距离;  $N_{\text{cri}}$  可取为  $0.55 \times 10^8$ <sup>[23]</sup>。

初始电晕产生后, 会在放电间隙中形成流注区, 流注区产生的自由电子汇集到流注的根部, 自由电子在根部与气体分子发生碰撞, 传递给气体分子能量(平动能、旋转能、电子激发能和振动能等), 该部分能量将在  $10^{-5}\text{s} \sim 10^{-3}\text{s}$  内转换为平动能  $H_t(T_h)$ ,  $T_h$  为气体分子的平动能温度。若假定流注区内气体分子质量恒定, 则平动能方程<sup>[24]</sup>满足:

$$\begin{cases} H_t(T_h) = 3.5kn_h T_h \pi r_{\text{stem}}^2 \\ \frac{dH_t(T_h)}{dt} = (f_t + f_r + f_e)EI + \frac{W_v(T_v) - W_v(T_h)}{\tau_{vt}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_t$ 、 $f_r$ 、 $f_e$  分别为平动能、旋转能、电子激发能的转换系数,  $f_t + f_r + f_e = 0.07$ ;  $k$  为玻尔兹曼常数;  $n_h$  为气体分子密度;  $r_{\text{stem}}$ 、 $E$ 、 $I$  分别为流注底部的半径、场强和通过的电流;  $T_v$  为分子振动能温度;  $\tau_{vt}$  为振动能转化为平动能的时间常数;  $W_v(T)$  为气体分子振动能, 振动能的平衡方程可表示为

$$\begin{cases} W_v(T_v) = n_h \pi r_{\text{stem}}^2 \frac{\varepsilon_v}{\exp(\frac{\varepsilon_v}{kT_v}) - 1} \\ \frac{dW_v(T_v)}{dt} = f_v EI - \frac{W_v(T_v) - W_v(T_h)}{\tau_{vt}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\varepsilon_v$  为氮气分子振动基态激发能, 约为  $0.28\text{eV}$ ;  $f_v$  为振动能的转化系数,  $f_t + f_r + f_e + f_v = 1$ 。当流注底部温度达到  $1500\text{K}$  时电导率明显增大, 先导开始形成。流注底部温度与流注区域产生的电子数有关, 根据上述气体分子的动能平衡方程式, 当流注区域的空间电荷大于  $1\mu\text{C}$  时<sup>[23]</sup>, 可认为满足流注向先导转化的温度条件。

### 2.3 正极性上行先导发展物理机制

上行先导起始后, 认为下行先导以一定速度呈阶梯状向下发展, 对应的上行先导发展过程如图 4。上行先导头部的电位<sup>[25]</sup>为

$$U_{\text{tip}}^i = -l^i E_{\infty} - x_0 E_{\infty} \ln\left(\frac{E_{\text{str}}}{E_{\infty}} - \frac{E_{\text{str}} - E_{\infty}}{E_{\infty}} e^{-\frac{l^i}{x_0}}\right) \quad (5)$$

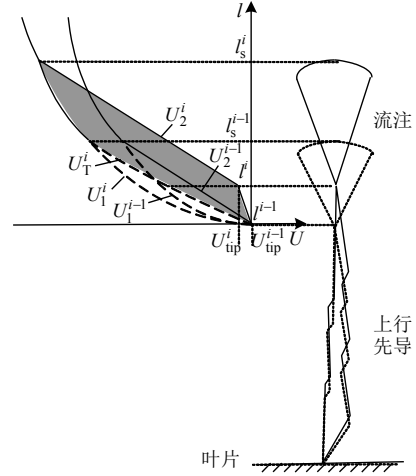


图 4 先导发展模型

Fig. 4 Upward leader developing model

式中:  $E_{\infty}$  为准静态先导场强稳态值,  $3 \times 10^4\text{V/m}$ ;  $E_{\text{str}}$  为流注区电场近似于恒定值,  $4.5 \times 10^5\text{V/m}$ ;  $x_0$  为长度系数,  $0.75\text{m}$ 。

当下行先导发展到  $i-1$  步, 不考虑流注区域空间电荷时, 背景电位为  $U_1^{i-1}$ , 考虑流注区空间电荷后电位畸变为  $U_2^{i-1}$ 。当下行先导发展到  $i$  步时, 假设上行先导没有发展, 背景电位变为  $U^i$ , 此时考虑到第  $i-1$  步的空间电荷, 电位畸变为  $U_1^i$ 。在先导头部从  $l^{i-1}$  发展到  $l^i$  的过程中, 流注头部发展到  $l_s^i$ , 流注区域的电位变为  $U_2^i$ 。图 4 中阴影面积可表示该过程中新产生的电荷  $\Delta Q$ <sup>[26]</sup>, 可近似用下式<sup>[11]</sup>计算:

$$\begin{aligned} \Delta Q^i &= K_Q \int_{l^{i-1}}^{l_s^i} U_2^i - U_1^i dl = \\ &K_Q \int_{l^{i-1}}^{l_s^i} (U_2^i - U_2^{i-1} - U_1^i + U_1^{i-1}) dl \end{aligned} \quad (6)$$

式中  $K_Q$  为环境因子, 取值为  $3.5 \times 10^{-11}\text{C}/(\text{V} \cdot \text{m})$ 。下一步先导的增长量可表示为

$$\Delta l^i = \frac{\Delta Q^i}{q_L} \quad (7)$$

式中  $q_L$  为满足流注向先导转化时, 单位长度先导所需要的电量, 对于自然界雷电取值约为  $65 \times 10^{-6}\text{C/m}$ 。则下一步上行先导头部位置为

$$l^{i+1} = l^i + \Delta l^i \quad (8)$$

### 2.4 风机叶片动态击距计算

由上述先导发展机制, 认为上、下行先导的流注相遇时发生雷击。因此, 计算时叶片上某一点的动态击距定义为当下行先导处于该点正上方, 发生雷击时上行先导流注头部相对于该研究点的高度。



利用先导模型确定击距更加符合实际的雷击过程。

计算中, 风机模型的参数为塔筒高 70m, 叶片长 40m, 叶片内引下线半径 0.01m, 塔筒半径 2.5m。

1) 根据雷云和下行先导位置, 求出风机周围的背景电位<sup>[12]</sup>, 利用式(2)计算空间电离产生的电荷数, 判定电晕起始, 若电晕不起始, 下行先导进一步向下发展;

2) 电晕起始后, 由风机周围电位曲线计算电晕区域电荷  $\Delta Q$ , 当  $\Delta Q > 1\mu\text{C}$  时流注向先导转化, 否则下行先导进一步向下发展;

3) 先导起始后, 假定初始先导长度 0.05m, 根据电位畸变曲线利用式(5)—(8)计算上行先导发展过程, 当上下行先导头部之间的平均场强为  $E_{\text{str}}$  时确定接闪, 最终求得上行先导和流注的发展高度。

本文为减小计算量, 认为上行先导长度  $> 2\text{m}$  可形成稳定上行先导<sup>[15]</sup>。上下行先导发展的整体速度比在 1:4~1:1 之间变化<sup>[27-28]</sup>, 对于自然界雷击这样的超长间隙放电, 计算发现其整体速度比更接近 1:4<sup>[11]</sup>。由上行先导稳定起始时下行先导的对地高度, 结合速度比可给出动态击距的近似值。由先导模型, 当雷电流为 30kA, 下行先导步长为 10m, 速度比取 1:4 时得到风机叶片的动态击距曲线如图 5 所示, 可以看出当塔筒高度、雷电流幅值固定时, 叶片的击距与叶片上的位置和旋转角度有关。

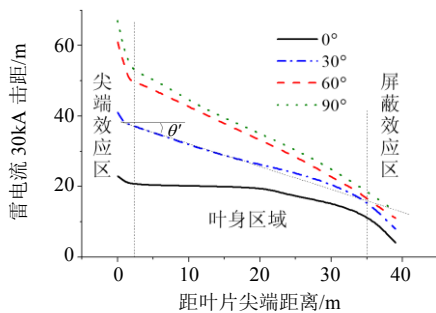


图 5  $I=30\text{kA}$  时动态击距曲线

Fig. 5 Dynamic striking distance curve in  $I=30\text{kA}$

风机叶片的动态击距曲线可分为三个区域, 在尖端效应区存在明显的上翘, 这是由叶尖接闪器尖端效应导致的, 接闪器周围的空间电位畸变严重, 更容易产生上行先导, 所以其击距明显大于叶身处。叶身区域击距随距叶片尖端距离的增加而减小, 可近似用一条斜向下的直线表示叶身击距  $R_b(I)$ ,  $l$  表示距叶尖距离, 如图 5 中的虚线所示。虚线与横坐标方向的夹角为  $\theta'$ , 称之为叶身动态击距拟合角, 为负值。在屏蔽效应区, 由于风机塔筒

屏蔽效应, 击距下降速度加快, 该现象在叶片角度越接近水平时越明显。IEEE 根据大量现场运行数据推荐的击距公式<sup>[29]</sup>在地面物体防雷中有广泛应用, 但只能给出风机叶片竖直向上时叶尖接闪器的击距, 利用 IEEE 推荐公式计算叶尖接闪器击距为 72.9m, 与本文击距模型得到叶尖接闪器击距 67m 比较接近, 证明了本文击距模型的可靠性。

### 3 基于风机叶片电气几何原理的防雷系统效率计算方法

#### 3.1 风机叶片防雷系统效率表征

电气几何法自提出以来经过了不断改进, 1993 年 IEEE 工作组基于长期的数据统计和研究, 提出了采用暴露距离的方法来计算防雷系统的拦截效率<sup>[29]</sup>, 该方法同样假定下行先导竖直向下发展, 与本文先前做的假设一致。其中暴露距离是指暴露弧两端点之间的水平距离, 如图 6 所示。

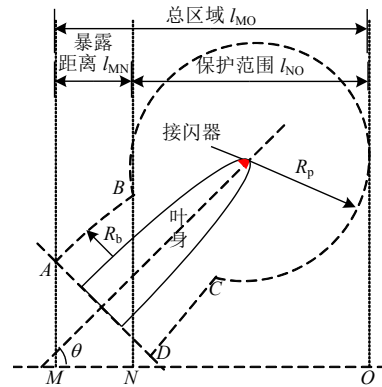


图 6 叶片防雷系统雷电拦截效率分析图

Fig. 6 Lightning interception efficiency analysis of blade LPS

IEC 61400-24 中提出风机防雷系统效率  $E$  的计算公式:

$$E = E_i \cdot E_s \quad (9)$$

式中:  $E_i$  为风机叶片的拦截效率;  $E_s$  为叶片防雷系统分级效率。

当雷电流幅值为  $I$ 、叶片呈角度  $\theta$  时, 根据暴露距离法得叶片的拦截效率:

$$E_i = \frac{l_{MO} - l_{MN}}{l_{MO}} \quad (10)$$

当雷电流幅值  $I_{\min} < I < I_{\max}$ , 由式(9)、(10)得到风机叶片与水平方向呈角度  $\theta$  时, 叶片防雷系统效率为

$$E_{\theta} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \frac{l_{MO}(I) - l_{MN}(I)}{l_{MO}(I)} E_s f(I) dI \quad (11)$$

式中:  $f(I)$  为关于雷电流幅值的概率函数<sup>[30]</sup>; 对于有多接闪器的风机叶片;  $l_{MN}$  表示暴露距离的总和。

在实际风机运行中, 风机叶片处于不断旋转状态, 式(11)中的各距离不仅是  $I$  的函数, 也是  $\theta$  的函数。考虑到风机旋转过程以及叶片在  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$  时更易遭受雷击, 令式(11)在  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$  内几何平均值作为运行风机叶片防雷系统效率:

$$E = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} \frac{l_{MO}(I, \theta) - l_{MN}(I, \theta)}{l_{MO}(I, \theta)} E_s f(I) dI d\theta \quad (12)$$

在此认为防雷系统泄流容量足够大, 只要接闪器接闪成功则不会对叶片造成损伤, 则  $E_s$  取值为 1。

### 3.2 暴露距离计算

暴露距离  $l_{MN}$  是获得风机叶片防雷系统效率的重要参数。下面将以两接闪器叶片暴露距离计算为例, 说明风机叶片暴露距离计算方法。由于叶片的旋转具有旋转对称性, 计算中  $\theta$  取值为  $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 。

叶片具有侧接闪器时击距的包络范围如图 7 所示。  $l_1$ 、 $l_2$  分别表示两接闪器和接闪器到所研究叶片起点间的距离; 屏蔽弧  $B_1C_1$ 、 $D_1D_2$  分别为以叶尖接闪器和叶身接闪器为圆心, 两接闪器击距  $R_{p1}$ 、 $R_{p2}$  为半径的圆弧; 暴露弧  $A_1B_1$ 、 $C_1D_1$  到叶身的垂直距离为叶身的击距  $R_b(I)$ , 暴露距离即  $A_1$ 、 $B_1$  和  $C_1$ 、 $D_1$  水平距离的和。所研究叶片起点处  $O$  的叶身击距为  $R_b(l_1 + l_2)$ , 令  $A_1$  点坐标为  $(x_1, y_1)$ , 则有:

$$\begin{cases} x_1 = -R_b(l_1 + l_2) \sin \theta \\ y_1 = R_b(l_1 + l_2) \cos \theta \end{cases} \quad (13)$$

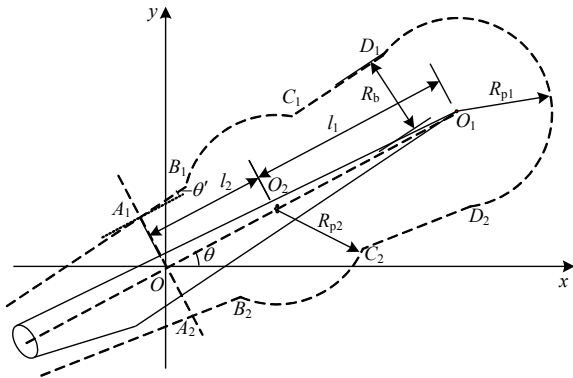


图7 暴露距离数学计算模型

Fig. 7 Mathematical model of exposure distance

叶片同一侧暴露弧(如  $A_1B_1$ 、 $C_1D_1$ )可近似认为在同一条直线上,  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$  所在的直线为

$$y = x \tan(\theta - \theta') + R_b(l_1 + l_2) \sin \theta \tan(\theta - \theta') + R_b(l_1 + l_2) \cos \theta \quad (14)$$

式中  $\theta'$  为叶身动态击距拟合角(图 5 中给出)。  $O_1$ 、 $O_2$  的坐标为

$$\begin{cases} O_1(x_{O_1}, y_{O_1}) = (l_1 \cos \theta + l_2 \cos \theta, l_1 \sin \theta + l_2 \sin \theta) \\ O_2(x_{O_2}, y_{O_2}) = (l_2 \cos \theta, l_2 \sin \theta) \end{cases} \quad (15)$$

则  $O_1$ 、 $O_2$  所在圆的方程为

$$\begin{cases} (x - l_1 \cos \theta - l_2 \cos \theta)^2 + (y - l_1 \sin \theta - l_2 \sin \theta)^2 = R_{p1}^2 \\ (x - l_2 \cos \theta)^2 + (y - l_2 \sin \theta)^2 = R_{p2}^2 \end{cases} \quad (16)$$

联立式(14)、(16), 可以求得坐标  $B_1(x_2, y_2)$ 、 $C_1(x_3, y_3)$ 、 $D_1(x_4, y_4)$  的数值, 根据叶片动态击距作出电气几何模型图, 可确定各点位置。对于图 7 所示存在两端暴露弧的情况, 需要舍弃  $x$  值最大的一组解且有  $x_2 < x_3 < x_4$ 。则暴露距离  $l_{MN}$  为

$$l_{MN} = x_4 - x_3 + x_2 - x_1 \quad (17)$$

所研究叶片部分对应的总区域  $l_{MO}$  为

$$l_{MO} = (l_1 + l_2) \cos \theta + R_{p1} + \max[R_b(l_1 + l_2) \sin \theta, R_{p2} - l_2 \cos \theta] \quad (18)$$

将式(17)、(18)代入式(12)(或式(11))可得到所研究风机叶片部分的运行防雷系统效率  $E$ (或固定角度防雷系统效率  $E_{\theta}$ )。

## 4 基于风机叶片电气几何模型的防雷分析

### 4.1 叶片旋转角度对叶片防雷系统效率的影响

风机参数如 2.4 小节所述, 根据风机叶片电气几何模型, 得到 30kA 雷电流、只有叶尖接闪器的叶片, 在典型角度  $0^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $60^{\circ}$ 、 $90^{\circ}$  下的防雷系统效率  $E_{\theta}$ 。为了更直观地给出叶片防雷失效的情况, 本文根据叶片旋转对称性绘制了在  $0^{\circ} \sim 180^{\circ}$  内的防雷系统失效率曲线  $(1 - E_{\theta})$ , 如图 8 中 30kA 虚线所示。

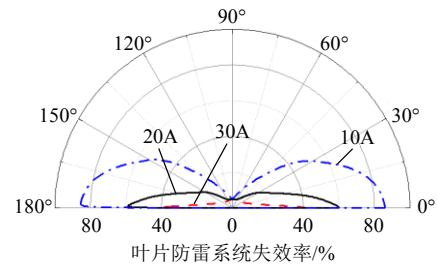


图8 不同雷电流幅值下叶片防雷系统失效率

Fig. 8 Failure rate of blade LPS under

## different lightning current

图中极坐标的角度表示叶片旋转角度  $\theta$ ，半径表示叶片防雷系统失效率  $1 - E_\theta$ 。

在雷电流幅值 30kA 时，叶片旋转角度越接近水平线，防雷系统失效率越大。当角度为  $0^\circ$  时，失效率为 40% 左右，当叶片角度转到  $30^\circ$  过程中，失效率迅速下降接近于 0。这是由于叶片角度越大，叶尖接闪器尖端的空间电位畸变越明显，越容易起始上行先导，致使接闪器的击距增大，暴露弧长度迅速减小，叶片处于叶尖接闪器的防护范围内。

通过对风机角度的研究，建议在暴风雨天气风机停运时，避免有风机叶片接近水平，可使一叶片竖直向上，可有效的提高叶片防雷系统效率。

#### 4.2 雷电流幅值对叶片防雷系统效率的影响

改变雷电流幅值(30、20、10kA)，并保证其他参数不变，研究雷电流幅值对叶片防雷效率的影响，不同雷电流幅值下叶片防雷系统失效率如图 8 所示。当雷电流 20kA， $\theta=30^\circ$  时，失效率为 17%， $\theta=60^\circ$  时失效率已降至为 0；当雷电流 10kA， $\theta=30^\circ$  时，失效率为 53%， $\theta=60^\circ$  时其失效率为 15%。发现随着雷电流幅值的减小，叶片的防雷效率下降明显，且叶片完全防护的角度也随之减小。故雷电流越小，叶片越容易遭受雷击。

这是由于雷电流的改变导致叶片的击距发生变化，影响了叶片的防雷效率。雷电流 20kA 时动态击距曲线如图 9 所示，对比图 5 发现，叶片尖端和叶身处的击距都有明显的减小，且接闪器尖端效应减弱，使得屏蔽弧范围变小，导致叶片接闪不成功的概率增大。

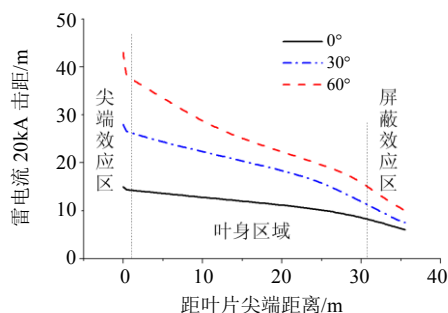


图 9  $I=20\text{kA}$  时动态击距曲线

Fig. 9 Dynamic striking distance curve ( $I=20\text{kA}$ )

采用镍铬丝引弧方式<sup>[31]</sup>，对叶片多孔夹层材料进行冲击电流试验，发现 10kA 电流下就可以造成不可逆的烧蚀损伤，留下安全隐患。如图 10 所示，为风机叶片夹层材料(PET,  $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ )在冲击电

流下的损伤情况，在电流 15kA 时材料烧蚀严重，7.5kA 时只有在电弧通过周围一小块区域有碳化现象，故建议  $I_{\min}$  取值要小于 10kA。

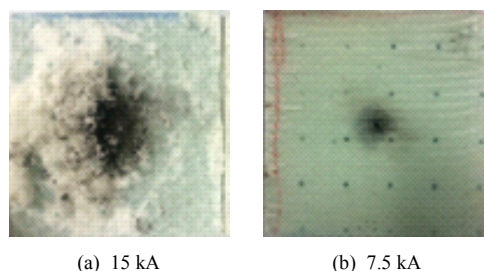


图 10 冲击电流下叶片材料损伤图

Fig. 10 Blade material damage under impact current

#### 4.3 叶身接闪器对叶片防雷系统效率的影响

为研究叶身接闪器对叶片保护的影响，在距离叶片尖端 7m 处加入一叶身接闪器，得到 30kA 雷电流该叶片防雷系统失效率如图 11 绿色曲线所示。对比一接闪器情况，当叶片水平时，防雷系统拦截失效率由 41% 降至 25%，加入的叶身接闪器可有效地增加屏蔽弧的范围，从而提高了叶片防雷系统效率。

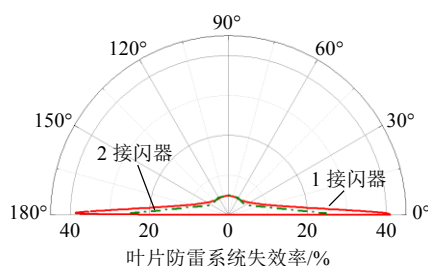


图 11 不同接闪器数量下叶片防雷系统失效率( $I=30\text{kA}$ )

Fig. 11 Failure rate of blade LPS under different number of receptors ( $I=30\text{kA}$ )

由于接闪器之间存在屏蔽效应，当两接闪器距离较近时，叶尖接闪器较原先的击距会有所下降，计算发现叶身接闪器距叶尖接闪器 1m 左右时，叶尖接闪器击距下降大约 2m。所以在布置接闪器位置时，需要根据叶片电气几何模型来确定接闪器的排放，以达到叶片防雷效率的要求，不能简单地增加接闪器数量，否则可能会出现增加接闪器数量反而导致叶片防雷效率下降的现象。

## 5 实验验证

明确暴露弧与屏蔽弧的范围，是叶片电气几何法计算的基础。为验证模型的有效性，对实际雷击风机叶片的过程进行简化，在华北电科院沙河试验站开展了实体风机叶片的长间隙放电实验，寻找暴



露弧与屏蔽弧分界处位置。实验原理图如图 12 所示, 风机叶片采用 sinoma45.2B-1.5MW 叶片的前五米(只有叶尖接闪器), 与地面的夹角  $\theta$  约为  $30^\circ$ , 利用棒状上电极模拟雷电下行先导, 沿图中箭头所示方向以  $0.75\text{m}$  为步长从叶尖正上方开始移动, 寻找 50% 接闪率上电极位置, 此位置可认为是暴露弧与屏蔽弧分界处。冲击电压采用  $250/2500\mu\text{s}$  负极性操作波。数码相机采用长曝光方式记录放电路径, 来判定叶片防雷系统接闪成功与失败, 其中接闪成功包括击中叶尖接闪器尖端、接闪器侧面和滑闪击中接闪器, 如图 13(a)、(b)、(c) 所示; 接闪失败为击中叶身, 没有经过接闪器泄流, 如图 13(d) 所示。

在每个上电极位置进行 20 次放电实验, 统计实验数据并绘制其拟合曲线如图 14 绿色曲线所示, 若取概率 50% 处为屏蔽弧与暴露弧的交界处, 其值约为  $2.3\text{m}$ 。采用本文介绍的风机叶片电气几何模

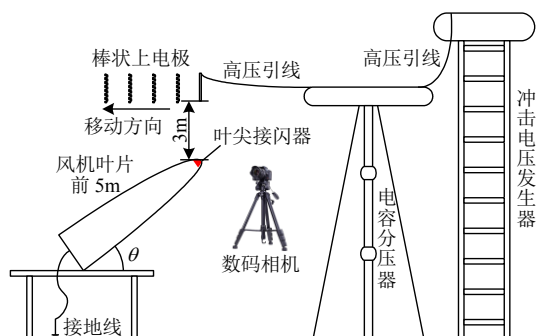
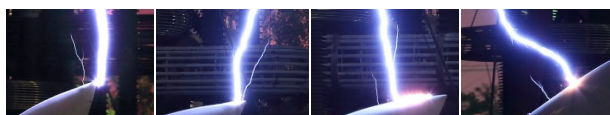


图 12 实验原理图

Fig. 12 Schematic diagram of experimental setup



(a) 接闪成功(击中接闪器尖端) (b) 接闪成功(击中接闪器侧面) (c) 接闪成功(滑闪击中接闪器) (d) 接闪失败(击中叶身)

图 13 放电路径观测结果

Fig. 13 Observation results of discharge path

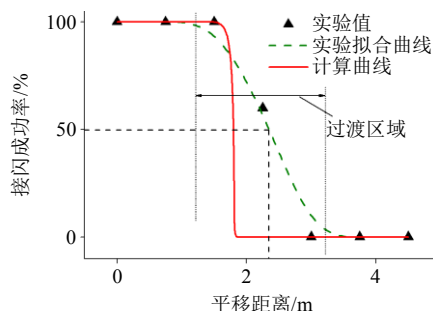


图 14 计算值与实验值对比图

Fig. 14 Comparison of calculated values and

## experimental values

型, 得到该种情况下暴露弧与屏蔽弧的分界处在  $1.8125\text{m}$  处, 两者误差为  $0.4875\text{m}$ , 相对于实验值的相对误差:

$$\delta = \frac{|l_c - l_e|}{l_e} \times 100\% = 21\%$$

式中  $l_c$ 、 $l_e$  分别为计算值和实验拟合值。

在所计算的屏蔽弧范围内 ( $0 \sim 1.8\text{m}$ ) 与实验拟合曲线的最大误差约为  $19\%$ , 但平均误差只有  $3\%$  左右。在暴露弧范围内 ( $> 1.8\text{m}$ ), 模型将接闪成功率低于一定值当作完全不能防护处理, 保证了叶片电气几何模型的保护域度, 但在过渡区域内有一定的误差。

从整体上看, 计算曲线与实验拟合曲线形状接近, 具有一定的保护域度, 只有在过渡区域存在一定误差。实验证明了本文风机叶片电气几何模型的有效性。

需要说明是, 实验条件与真实风机的雷击环境难免存在差别, 实验与实际情况的等效性仍需要验证, 但所设计的实验一定程度上证明了本文方法的可靠性。

## 6 结论

1) 提出了风机叶片动态击距的概念及分析方法。通过雷电上行先导的物理发展模型, 给出了叶片动态击距的分布特征, 接闪器处的击距有明显增大, 并且该分析方法为具有复杂结构的地面物体防雷提供思路;

2) 构建了针对风机叶片防雷的电气几何模型。基于风机叶片动态击距的概念, 该模型将电气几何方法与雷电先导发展的物理过程相结合, 给出了叶片防雷系统效率的计算方法, 为叶片防雷系统的评估提供理论依据。文章设计了风机叶片长间隙击穿实验验证了该模型的有效性;

3) 用本文模型分析了  $1.5\text{MW}$  风机叶片的防雷系统效率。增设叶身接闪器可以有效的提高叶片的防雷效率。

## 参考文献

- [1] International Electrotechnical Commission. IEC 61400-24: Wind turbine-Part 24: Lightning protection[S]. IEC, 2010.
- [2] 郭子忻, 李庆民, 闫江燕, 等. 海上风电场雷击演化物



- 理机制的研究综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(5): 10-19.
- Guo Zixin, Li Qingmin, Yan Jiangyan, et al. Summary of research on physical evolution mechanism of lightning discharge of offshore wind farms[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(5): 10-19(in Chinese).
- [3] Muto A, Suzuki J, Ueda T. Performance comparison of wind turbine blade receptor for lightning protection[C]// Proceedings of the International Conference on Lightning Protection (ICLP). Cagliari, Italy: IEEE, 2010.
- [4] Montanyá J, March V, Hermoso B, et al. High-speed videos of laboratory leaders emerging from wind turbine blade tips[C]// Proceedings of the 30th International Conference on Lightning Protection (ICLP). Cagliari, Italy: IEEE, 2010.
- [5] Garolera A C, Holboell J, Madsen S F. Lightning attachment to wind turbine surfaces affected by internal blade conditions[C]// Proceedings of the International Conference on Lightning Protection (ICLP). Vienna, Austria: IEEE, 2012.
- [6] Armstrong H R, Whitehead E R. Field and analytical studies of transmission line shielding[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(1): 270-281.
- [7] Brown G W, Whitehead E R. Field and analytical studies of transmission line shielding: part II[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(5): 617-626.
- [8] 谢耀恒, 刘赟, 叶会生, 等. 正极性操作冲击下棒-棒间隙先导发展试验与仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5983-5989.
- Xie Yaoheng, Liu Yun, Ye Huisheng, et al. Experimental and simulation study on the leader development in rod-rod air gaps under positive switching impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5983-5989(in Chinese).
- [9] 师伟, 李庆民. 基于先导放电理论的雷击上行先导起始研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(15): 2470-2477.
- Shi Wei, Li Qingmin. Research on the lightning upward leader inception based on leader discharge theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(15): 2470-2477(in Chinese).
- [10] 师伟. 雷击特高压输电线路先导连接过程数值模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- Shi Wei. Numerical simulation of lightning attachment to UHV transmission lines[D]. Ji'nan: Shandong University, 2015(in Chinese).
- [11] 谢施君, 何俊佳, 陈维江, 等. 避雷针迎面先导发展物理过程仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 32-40.
- Xie Shijun, He Junjia, Chen Weijiang, et al. Simulation study on the development process of the upward leader incepted from lightning rod[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 32-40(in Chinese).
- [12] 马宇飞, 张黎, 闫江燕, 等. 风机叶片雷击上行先导的起始物理机制与临界长度判据[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5975-5982.
- Ma Yufei, Zhang Li, Yan Jiangyan, et al. Inception mechanism of lightning upward leader from the wind turbine blade and a proposed critical length criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5975-5982(in Chinese).
- [13] Long M N, Becerra M, Thottappillil R. On the Lightning Incidence to Wind Farms[C]// Proceedings of the 33rd International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estaril, Portugal: IEEE, 2016.
- [14] Becerra M, Cooray V. A self-consistent upward leader propagation model[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(16): 3708-3715.
- [15] Becerra M, Cooray V. A simplified physical model to determine the lightning upward connecting leader inception[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 897-908.
- [16] Rakov V A, Uman M A. Lightning: Physics and effects[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.
- [17] Amoroso V, Lattarulo F. Thundercloud pre-stroke electrostatic modeling[J]. Journal of Electrostatics, 2002, 56(2): 255-276.
- [18] Eriksson A J. The lightning ground flash: an engineering study[D]. Pretoria, South Africa: University of Natal, 1979.
- [19] Soula S, Chauzy S. Multilevel measurement of the electric field underneath a thundercloud: 2. Dynamical evolution of a ground space charge layer[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(D12): 22327-22336.
- [20] Willet J C, Davis D A, Laroche P. An experimental study of positive leaders initiating rocket-triggered lightning[J]. Atmospheric Research, 1999, 51(3-4): 189-219.
- [21] Cooray V, Rakov V, Theethayi N. The lightning striking distance—Revisited[J]. Journal of Electrostatics, 2007, 65(5-6): 296-306.
- [22] Abdel-Salam M, Turkey A A, Hashem A A. The onset voltage of coronas on bare and coated conductors[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(19): 2550.
- [23] Gallimberti I, Bacchiega G, Bondiou-Clergerie A, et al. Fundamental processes in long air gap discharges[J]. Comptes Rendus Physique, 2002, 3(10): 1335-1359.
- [24] Gallimberti I. The mechanism of the long spark

- formation[J]. Le Journal de Physique Colloques, 1979, 40(C7): C7-193-C7-250.
- [25] Rizk F A M. A model for switching impulse leader inception and breakdown of long air-gaps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 596-606.
- [26] Goelian N, Lalande P, Bondiou-Clergerie A, et al. A simplified model for the simulation of positive-spark development in long air gaps[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30(17): 2441-2452.
- [27] Deller L, Garbagnati E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. I. Description of the model and evaluation of exposure of free-standing structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 2009-2022.
- [28] Deller L, Garbagnati E. Lightning stroke simulation by means of the leader progression model. II. Exposure and shielding failure evaluation of overhead lines with assessment of application graphs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 2023-2029.
- [29] Whitehead J T, Chisholm W A, Anderson J G, et al. IEEE working group report. Estimating lightning performance of transmission lines. II: Updates to analytical models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1254-1267.
- [30] IEC 62305-1: Protection Against Lightning-Part 1: General Principles[S]. IEC, 2006.
- [31] 闫江燕, 张黎, 李庆民, 等. 风机桨叶用 PVC 和巴塞木雷击电弧损伤的分子模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 292-300.
- Yan Jiangyan, Zhang Li, Li Qingmin, et al. Molecular simulation on the degradation characteristics of PVC and balsa wood used in wind turbine blade under lightning induced arc[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 292-300(in Chinese).



王国政

收稿日期: 2017-01-12。

作者简介:

王国政(1993), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压预绝缘技术、风力发电机组击防护等, guozhengwang@foxmail.com;

张黎(1979), 男, 副教授, 硕士生导师, 要研究方向为高电压与绝缘技术、特高压电磁物理现象与应用技术和雷电物理等, 本文通讯作者, zhlee@sdu.edu.cn。

(责任编辑 车德竞)